

Nodularna grafitna jeklena litina

UDK: 669.141.25
ASM/SLA: CI-r

Franc Mlakar

Nodularna grafitna jeklena litina lahko uspešno zamenjuje jekleno ali sivo litino s kroglastim grafitom, predvsem zaradi visoke odpornosti proti obrabi in dobre dušilnosti. V članku je opisan kratek potek izdelave te litine in vpliv termične obdelave na strukturo in mehanske lastnosti.

Obravnavane so tudi preiskave na dilatometru in elektronskem mikroanalizatorju, ki so jih izvršili na metalurškem inštitutu v Ljubljani.

UVOD

Nodularno grafitno jeklo je jeklo evtektoidne ali nadevtektoidne sestave, ki ima ogljik izločen v obliki nodul. Jeklo z visokim Si in okoli 1,5 % C se v glavnem izdeluje s kovanjem in žarjenjem, medtem ko se grafitno jeklo z več kot 0,8 % C in nižjim silicijem (0,4 % ali več) pridobiva v litem stanju z dodatkom ustrezne kalcijeve zlitine v tekoče jeklo.

SESTAVA NODULARNE GRAFITNE JEKLENE LITINE (NGJL)

Za izdelavo nodularne jeklene litine mora biti ogljikova vsebnost več kot 0,8 % in najmanj 0,4 % Si. Pomembno je to, da pri tako nizki vsebnosti silicija lahko dobimo nodularni grafit v litem stanju. Normalno pa se NGJL pridobiva s sestavo, kjer je ogljik 1,1–1,6 % in silicij okoli 1 %. Glede na uporabo se lahko nodularna jeklena litina proizvaja tudi z vsebnostjo silicija do 2 %. NGJL se da variti, če ima 1,3 % C ali manj.

Poleg že omenjene sestave se temu jeklu lahko dodajajo legirni elementi: krom, mangan, vanadij, volfram, molibden, aluminij, baker in nikelj. Pri tem moramo upoštevati dejstvo, da krom, mangan,

vanadij in volfram ovirajo tvorbo nodularnega grafita. Ta tendenca je najmočnejša pri kromu. Dodajanje molibdena do 0,4 % nima skoraj nobene vpliva na grafitizacijo jekla, večji dodatki pa kažejo tendenco zaviranja grafitizacije. Aluminij, baker in nikelj so vsi normalni grafitizacijski elementi.

Taljenje nodularne grafitne jeklolitine

Grafitno jeklo se normalno tali v elektroobločnih ali indukcijskih pečeh. Pri taljenju je važno doseganje visoke stopnje dezoksidacije in odžveplanja v kopeli. Zato se dezoksidacijska sredstva dajejo v peč. Dezoksidacijsko sredstvo je aluminij, ki je v tem primeru grafitizacijski element. Količina preostalega žvepla v talini mora biti nižja od 0,02 % in kisika manj od 0,005 %. To je potrebno zaradi večjega učinka preostalega kalcija, uvedenega v talino pri dodajanju specialne kalcijeve zlitine. Če je količina kisika in žvepla v tekoči talini visoka, se večina uvedenega kalcija takoj veže z njima v okside in sulfide, ki splavajo na površino kopeli. Tako dodan kalcij ni bil ves uveden v talino, ampak se je v obliki spojin vključil v žlindro in je tako eliminiran njegov vpliv.

Specialna kalcijeva zlitina

Zlitina zlahka absorbira vlago, zato ne sme biti izpostavljena zraku. Uporablja se v kosih od 1–10 mm. Če so kosi večji, zlitina splava na površje, če pa so manjši, pa zgori in je preostali kalcij v talini nizek.

Potrebna dodana količina zlitine se giblje od 1–1,5 %, za specialno proizvodnjo pa lahko tudi 2–3 %. Specialna kalcijeva zlitina, ki naj bi bila pregreta, se položi na dno ponovce, v katero se izpusti tekoče jeklo, ali pa se doda dvakrat ali trikrat v tekoč curek pri izpustu v ponovco. Sled-

Franc Mlakar je diplomirani inženir metalurgije in asistent v livarni valjev Zelezarne Store.

Tabela 1: Vrste specialnih kalcijevih zlitin

	Ca	Si	Fe	Mn	Al	C	P	S
Japonska zlitina	20—25	35—50	10—20	5—15	1,5	1,0	0,08	0,05
Nemška zlitina	16—20	55—59		14—18				

nji način dodajanja je boljši in daje boljše rezultate, če je legura embalirana v aluminijasto folijo. Pri reakciji se razvije rdečkasto oranžen plamen (značilen plamen kalcija). Reakcija je mirna in brez nevarnosti. Na ta način obdelano jeklo se mora uliti v čim krajšem možnem času, sicer se talina oksidira, pri čemer se preostali kalcij izloči kot oksid. Zaželeno je ulivanje najpozneje 30 minut po dodajanju legure, oziroma po izpustu. Če je čas čakanja daljši, mora biti dodatek kalcijeve zlitine temu primerno večji.

Temperatura, pri kateri se dodaja legura, je temperatura izpusta. Ta je odvisna od sestave ter količine taline in je od 1500—1600° C. Temperatura ulivanja pa je od 1430—1500° C.

Če je talina dezoksidirana in če je žvepla manj kot 0,02 %, je količina preostalega kalcija v talini proporcionalna količini dodane legure. Pri dodatku legure od 0,5—2,0 % je preostali kalcij od 0,007—0,04 % pri različnih ogljikovih jeklih. Običajno je dodatek 1,0—1,5 % zlitine zadosten za izdelavo nodularne grafitne jeklotitine.

Struktura nodularne grafitne jeklotitine

V osnovi sestoji lita struktura NGJL, proizvedena po tem postopku, iz nodularnega grafitna in perlita, brez prostega cementita ali z zelo malo prostega cementita. S povečanjem dodatka zlitine narašča delež izločenega nodularnega grafitna in gostota razporejenosti, grafitne nodule pa so manjše. Pri večjem dodatku zlitine se okrog grafitna lahko pojavi ferit, če jeklo vsebuje preko 1,5 % C. Če je vsebnost silicija pri takem jeklu okrog 2 %, se po termični obdelavi dobi feritno jeklo z nodularnim grafitom.

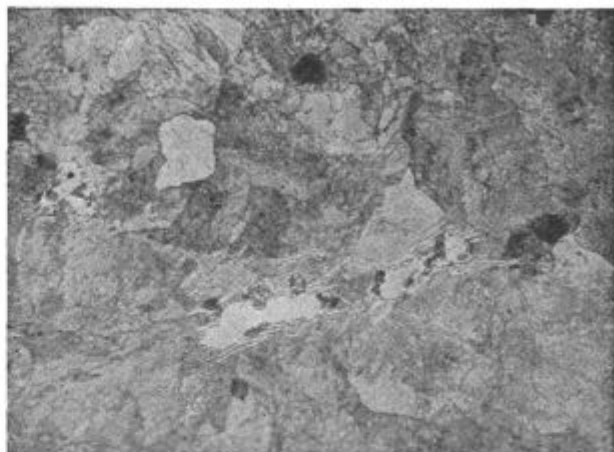
TERMIČNA OBDELAVA NODULARNE JEKLENE LITINE, IZDELANE V ŽELEZARNI STORE

Struktura in mehanske lastnosti NGJL po ulivanju

Tabela 2 — Sestava NGJL

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
1,51	1,67	0,94	0,048	0,015	0,43	0,22	0,39

Po ulivanju litine s to sestavo smo dobili grobozrnati perlit z nodularnim grafitom in nekaj prostega cementita (sl. 1).



Slika 1
Struktura NGJL po ulivanju (nital, 250 ×)

Fig. 1
Structure of SGCS after casting (nital, 250 ×)

Tabela 3 — Mehanske lastnosti v litem stanju:

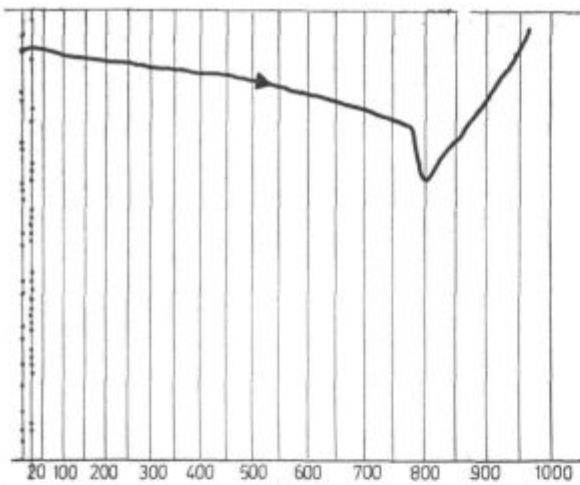
Natezna trdnost:	69,2 kp/mm ² 69,6 kp/mm ²
Raztezek:	1,6 % 1,6 %
Upogibna trdnost:	100,5 kp/mm ²
Upogibek:	3,0 mm
Žilavost:	0,9 kpm/mm ²
Trdota HB:	345 kp/mm ²

Določitev pogojev termične obdelave

J. Žvokelj nam je izmeril premenske točke litine, ugotovil strukturne spremembe, ki nastanejo pri različnih načinih žarjenja in izdelal TTT diagram pri kontinuirnem ohlajanju.

Premenske točke NGJL so bile določene pri ogrevanju s hitrostjo ogrevanja 300° C/h s Chevenardovim dilatometrom po diferencialni metodi (sl. 2).

Avstenizacija se začne pri 785° C (točka Ac₁) in se izvrši v zelo ozkem intervalu, kar potrjuje, da ima litina perlitno osnovo. Zanimivo je, da pri ogrevanju pred začetkom premene ne pride do grafitizacije perlitne strukture, ki se redno opaža pri ogrevanju nodularne litine s perlitno osnovo pri temperaturah nad 600° C do začetka premene. Močno naraščanje volumna v avstenitnem področju nastane zaradi raztapljanja grafitna v avstenitu.



Slika 2

Dilatometrijska krivulja pri ogrevanju NGJL

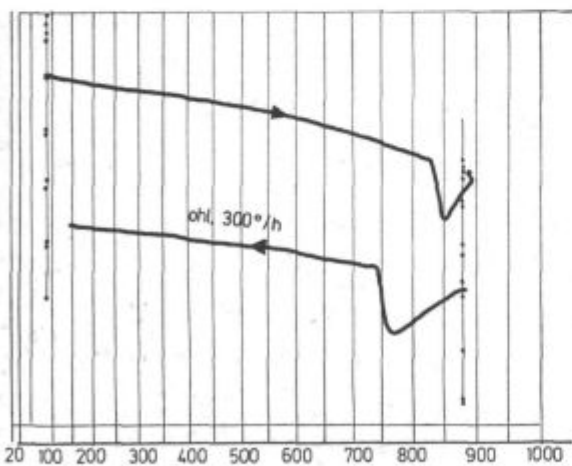
Fig. 2

Dilatometric curve for heating SGCS

Strukturne spremembe je Žvokelj zasledoval pri različnih temperaturah avstenitizacije in pri različnih hitrostih ohlajanja. Slika 3 kaže ogrevanje do 875°C, zadrževanje 30 minut na tej temperaturi in ohlajanje s hitrostjo 300°C/h, slika 4 pa žarjenje pri 930°C ter ohlajanje s hitrostjo 300°C/h in 60°C/h.

V vseh teh primerih nastane pri ohlajanju perlitna premena pri praktično isti temperaturi 760°C. Vsa zadrževanja pri ohlajanju pod to temperaturo ne vplivajo na spremembo strukture.

Kontinuirni TTT diagram (sl. 5) nam prikazuje, da je nodularna grafitna jeklotitina kaljiva. Pri velikih hitrostih ohlajanja dobimo martenzitno strukturo. Zaradi nizke temperature začetka martenzitne preme (okrog 120°C) je možno, da bo

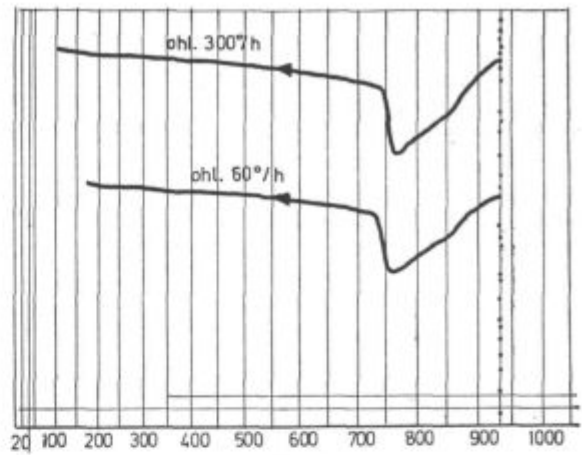


Slika 3

Dilatometrijska krivulja ogrevanja do 875°C in ohlajanja s hitrostjo ohlajanja 300°C/h

Fig. 3

Dilatometric curve for heating to 875°C and cooling at the rate 300°C/h



Slika 4

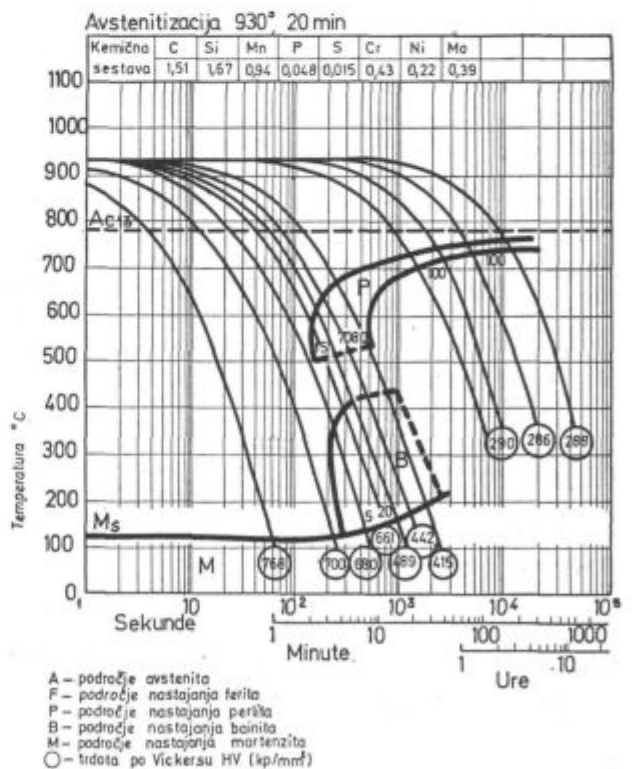
Dilatometrijska krivulja ohlajanja z 930°C s hitrostjo ohlajanja 300°C/h in 60°C/h

Fig. 4

Dilatometric curve of cooling from 930°C at the rates 300°C/h and 60°C/h

po hitrem ohlajanju v strukturi tudi nekaj zaostalega avstenita. Pri nekoliko manjših hitrostih ohlajanja nastane bainit. Bainitna struktura ni zanesljivo določljiva, zato je na diagramu narisana

Litina Štore-NGJL



Slika 5

TTT diagram pri kontinuirnem ohlajanju NGJL

Fig. 5

TTT diagram in continuous cooling of SGCS

črtkano. Pri počasnih ohlajanjih dobimo samo perlitno premeno.

Pri aplikaciji TTT diagrama za kontinuirna ohlajanja na praktične razmere pri termični obdelavi je treba upoštevati predvsem dimenzije predmetov. Z naraščajočo debelino ulitka, ki ga termično obdelamo v enakem sredstvu ohlajanja, se bo intenzivnost ohlajanja manjšala, prav tako pa je treba računati na razlike v hitrostih ohlajanja med sredino in površino debelejših ulitkov.

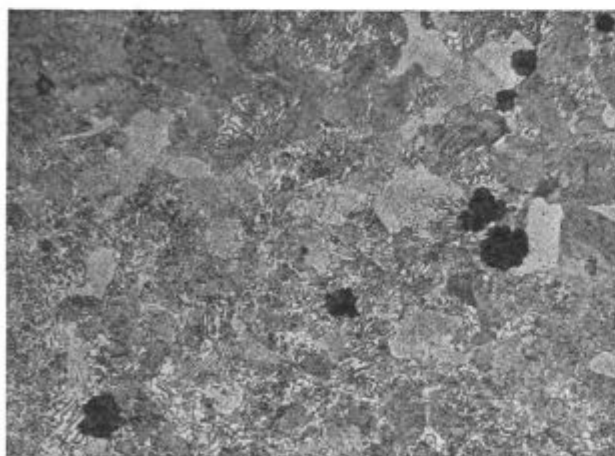
Enostopenjsko žarjenje NGJL

Žarili smo ulitke z debelino stene 25 mm. Ulitke smo žarili pri različnih temperaturah avstenitizacije 875, 900 in 930°C, in to pet ur. Nato smo jih ohlajali v zaprti peči.

Tabela 4 — Mehanske lastnosti po enostopenjskem žarjenju:

temperatura austenitizacije	875° C	900° C	930° C
natezna trdnost (kp/mm ²)	88,3 94,6	85,0 81,6	83,5 85,6
raztezek (%)	1,8 1,6	2,0 2,0	1,5 1,9
upogibna trdnost (kp/mm ²)	101,2	97,5	114,5
upogibek (mm)	10	9	12
žilavost (kpm/mm ²)	1,4	2,0	2,5
trdota HB (kp/mm ²)	292	298	313

Po enostopenjskem žarjenju dobimo zelo visoke upogibke in visoko žilavost, ki narašča s temperaturo žarjenja. Trdota je nižja od trdote v ulitem stanju in narašča s temperaturo žarjenja.



Slika 6

Struktura NGJL po enostopenjskem žarjenju pri 875° C (nital, 250 ×)

Fig. 6

Structure of SGCS after single step annealing at 875° C (nital, 250 ×)

Upogibna trdnost je pri 875 in 900° C približno enaka trdnosti v ulitem stanju, po žarjenju na 930° C pa naraste. Natezna trdnost in raztezek sta višja, nista pa odvisna od temperature žarjenja.

Po žarjenju dobimo drobnozrnati perlit z nodularnim grafitom. Opazno je naraščanje zrna z višjo temperaturo avstenitizacije.

Dvostopenjsko žarjenje NGJL

Žarili smo po treh temperaturnih postopkih:

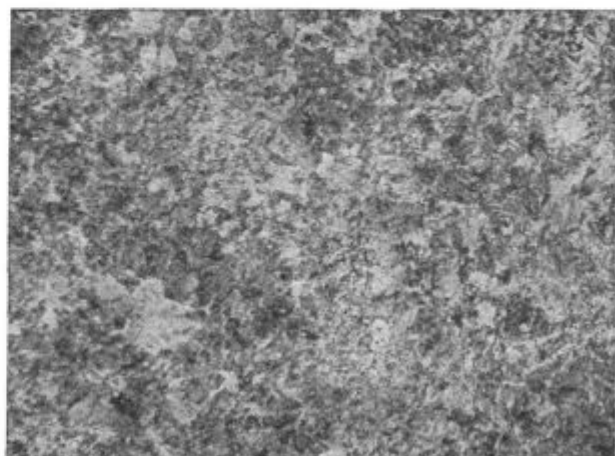
I. Ulitke smo žarili dve uri pri 900° C, nato ohlajali na zraku do 450° C, jih ogreli na 550° C in žarili pri tej temperaturi pet ur, nato pa ohlajali v zaprti peči.

II. Ulitke smo žarili dve uri pri 900° C, ohlajali na zraku do 450° C, jih ogreli na 600° C in žarili pri tej temperaturi pet ur, nato pa ohlajali v zaprti peči.

III. Ulitke smo žarili dve uri pri 900° C, jih ohlajali na zraku do 500° C in jih nato kontrolirano ohlajali s hitrostjo 20° C/h do 300° C, potem pa v zaprti peči.

Tabela 5 — Mehanske lastnosti po dvostopenjskem žarjenju:

temperaturni režim	I	II	III
natezna trdnost (kp/mm ²)	105,2 100,0	65,7 78,2	94,2 —
raztezek (%)	1,6 1,7	1,5 1,7	1,0 —
upogibna trdnost (kp/mm ²)	121,3	105,0	133,7
upogibek (mm)	4,00	3,0	9,0
žilavost (kpm/mm ²)	1,9	2,1	2,3
trdota HB (kp/mm ²)	393	363	404

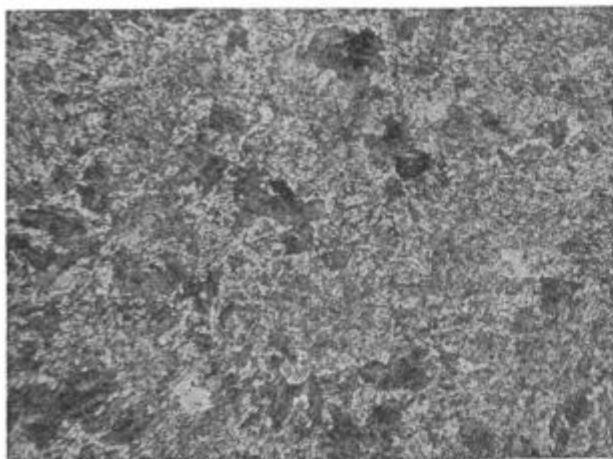


Slika 7

Struktura NGJL po dvostopenjskem žarjenju pri 900° C in 550° C (nital, 250 ×)

Fig. 7

Structure of SGCS after double-step annealing at 900° C



Slika 8

Struktura NGJL po dvostopenjskem žarenju pri 900° C in kontinuirnem ohlajanju od 500 do 300° C (nital, 250 ×)

Fig. 8

Structure of SGCS after double-step annealing at 900° C and continuous cooling from 500 to 300° C (nital, 250 ×) and 550° C (nital, 250 ×)

Po dvostopenjskem žarjenju sta trdota in upogibna trdnost višja kot pri enostopenjskem in raste z nižjo temperaturo druge stopnje. Ravno tako rasteta upogibek, ki je nižji, in žilavost, ki je približno enaka kot pri enostopenjskem žarjenju. Natezna trdnost po drugem režimu je nižja kot pri ostalih dveh.

Po prvih dveh načinih dobimo drobnozrnati perlit z nodularnim grafitom. Po žarjenju po tretjem postopku dobimo perlitnobainitno strukturo.

Žarjenje valjev iz nodularne grafitne jeklotitine

Na podoben način žarimo valje. Seveda so časi žarjenja daljši in so odvisni od premera valja. Po termični obdelavi dobimo finolamelarni perlit, med katerim so fine karbidne kroglice.



Slika 9

Struktura valja po termični obdelavi (nital, 630 ×)

Fig. 9

Structure of roll after heat treatment (nital, 630 ×)

PREISKAVA ŽARJENE NODULARNE GRAFITNE JEKLENE LITINE NA MIKROANALIZATORJU

Že pri metalografski preiskavi smo opazili dendritna in meddendritna področja. V notranjosti dendritov je osnova finolamelarni perlit, v meddendritnih prostorih pa najdemo tudi fine karbidne kroglice. V notranjosti tega področja najdemo karbidna zrna, ki so često obdana s karbidnimi lamelami, ki kažejo, da je to področje ledeburitnega značaja in da so velika karbidna zrna nastala pred kristalizacijo ledeburita. Drobne karbidne kroglice so verjetno sekundarnega porekla, to je, nastale so pri ohlajanju iz avstenita, ki je bil prenasičen z ogljikom.

Že pri pazljivem opazovanju v metalografskem mikroskopu se opazi, da večja interdendritska karbidna zrna niso enotna. To je potrdila površinska analiza na elektronskem mikroanalizatorju (sl. 10).

Osnova karbida vsebuje predvsem železo, je pa tudi bogata s kromom in vanadijem, vsebuje približno enako mangana kot jeklena osnova in zelo malo silicija. Dendritni zrastki v karbidnih zrnih vsebujejo fosfor, molibden, silicij in vanadij, ne pa kroma, mangana in železa. Tudi ledeburitne lamele okoli velikih karbidnih zrn so bogatejše s kromom kot njihova okolica.

Linjska analiza je potrdila ugotovitve površinske analize, omogočila pa je tudi, da se ocenijo koncentracije. Pot, po kateri so bili posneti profili koncentracije za Si, Mo, Mn, Cr, P, V in Ni, je vidna po diagonali na prvem elektronskem posnetku na sliki 11. Linija se prične malo pred karbidom v meddendritnem prostoru, gre potem skozi dendritni del in se konča za drugim karbidom v meddendritni coni, ki ima dendritni izrastek v sredini.

Krom izceja v karbidnih zrnih in lamelah okoli njih. V dendritnih vključkih v karbidnih zrnih izcejanja ni.

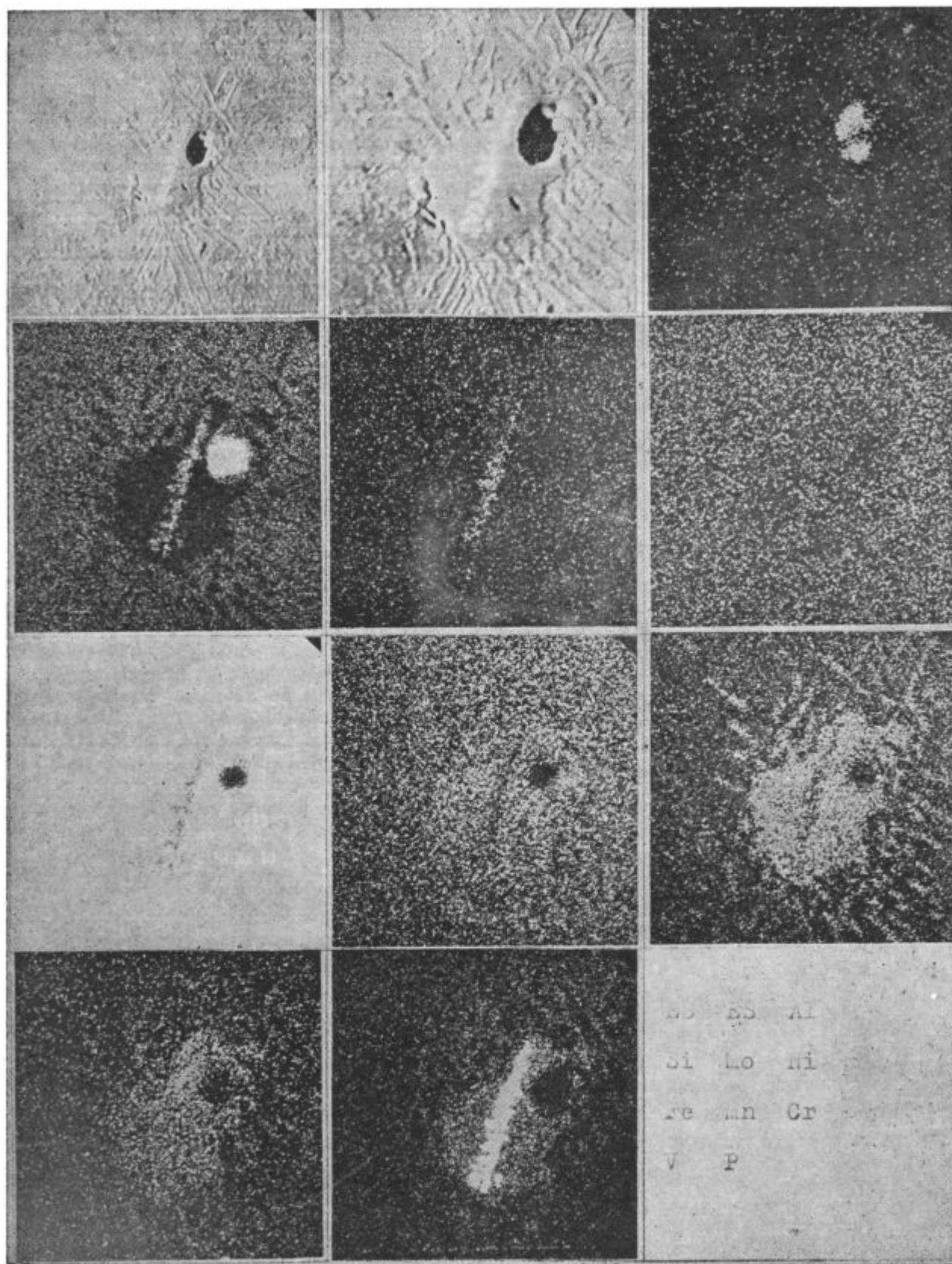
Nikelj ne kaže nobene zaznavne razlike v koncentraciji med sredino in robom dendritov. V karbidih, bogatih s kromom, ni niklja.

Koncentracija molibdena je na robu dendritov ob velikih karbidnih zrnih za 130 % večja kot v meddendritnem prostoru. Močno naraste koncentracija molibdena v karbidnih zrnih, še močneje pa v dendritnih vključkih znotraj le-teh.

Na robu dendritov, na meji z velikimi karbidnimi zrn, je silicija za 30 % več kot v dendritih. V karbidnih zrnih silicija ni, v dendritih v notranjosti teh zrn pa ga je precej več kot v osnovi.

Mangana je nekoliko več ob robu dendritov, kot v notranjosti dendritov. V karbidnih zrnih ga je za 100 % več. V dendritih v notranjosti teh zrn ga je pol manj kot v notranjosti dendritov.

Koncentracija fosforja je na robu dendritov za 120 % višja kot v notranjosti dendritov. Karbid-



Slika 10

Elektronske in specifične X slike karbidnega zrna z dendritom v sredini

Fig. 10

Electron and specific X-ray pictures of carbide grain with a dendrite in the centre

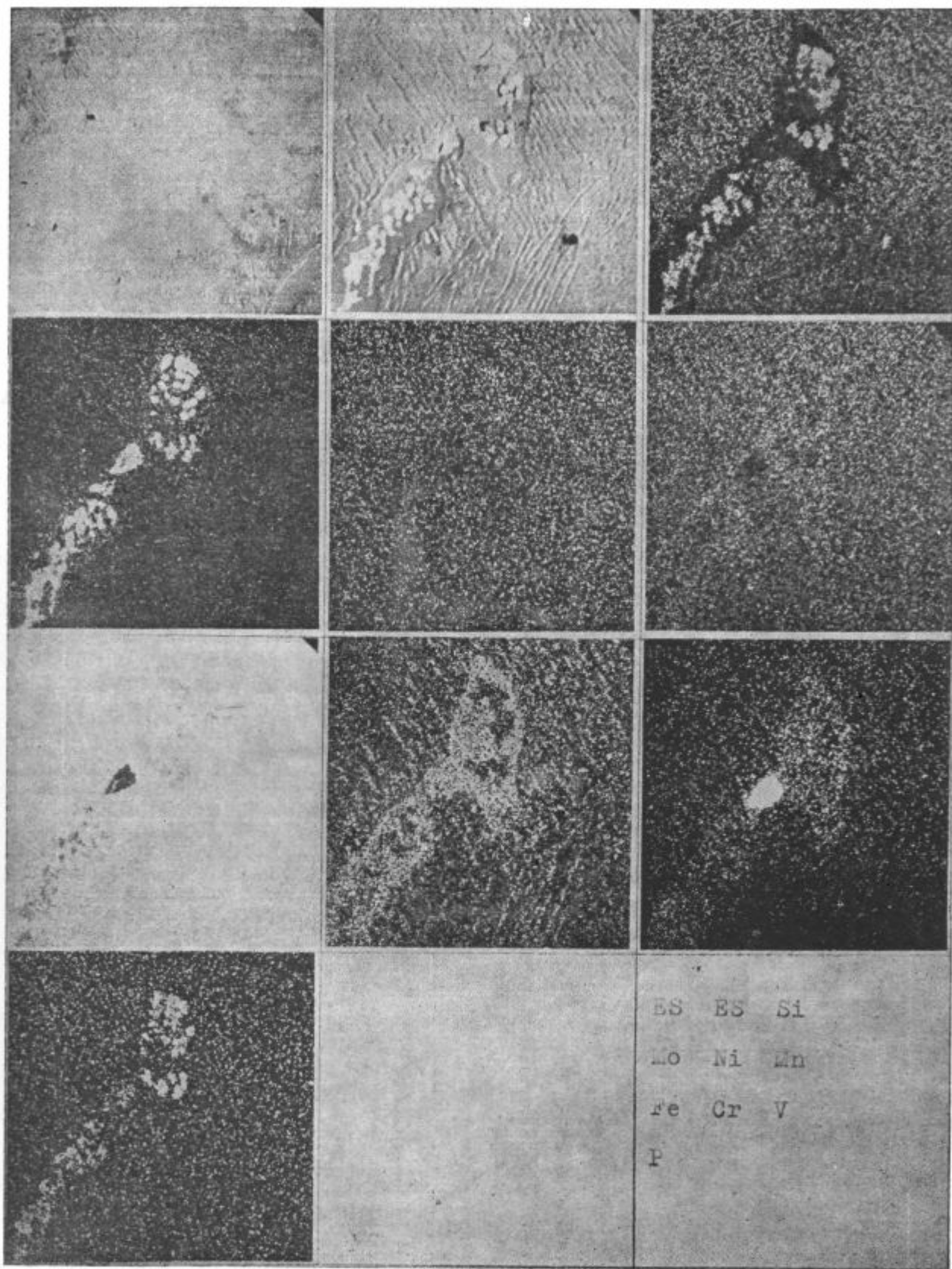


Fig. 11

Path of line analysis and specific X-ray pictures

Slika 11

Pot linijske analize in specifične X slike

na zrna imajo enako vsebnost fosforja kot notranjost dendritov. V dendritnih izrastkih, v njih je izcejanje fosforja izredno močno, saj je njegova koncentracija za 50-krat večja od osnove.

Vanadij v trdi raztopini ne izceja. Nekoliko več ga je v karbidnih zrnih. Mnogo več pa ga je v zrnih vanadijevega karbonitrida, ki vsebuje le sled drugih legirnih elementov, in so navadno tudi zraščena z velikimi karbidnimi zrnji.

LASTNOSTI IN UPORABA NODULARNE GRAFITNE JEKLOLITINE

Rezultati mehanskih preiskav kažejo, da je NGJL enaka jeklolitini in boljša od sive litine s kroglastim grafitom. Poleg tega ima nodularna jeklena litina zelo dobro dušilnost. Odlična lastnost NGJL pa je odpornost proti obrabi. Obraba je mnogo manjša kot pri legirani jeklolitini in sivi litini s kroglastim grafitom.

Nodularna jeklolitina se uporablja za zobnike, ročni gredi, avtomobilske dele itd. Zelo uspešno se NGJL uporablja za valje, posebno za blooming in predogrodja.

ZAKLJUČKI

1. Grafitna nodularna jeklena litina se pridobiva z dodatkom ustrezne kalcijeve zlitine v tekoče jeklo eutektoidne ali nadeutektoidne sestave.

2. Brez težav dobimo perlitno litino pri naslednji sestavi:

C	1,2—1,5 %
Si	1,2—1,5 %
Mn	0,7—1,5 %
P	min
S	pod 0,02 %
Cr	0,2—0,6 %
Ni	max 0,2 %
Mo	0,2—0,4 %

3. S termično obdelavo izboljšamo mehanske lastnosti litine.

4. NGJL ima dobro obrabno trdnost in dušilnost.

5. Nodularna grafitna jeklena litina je nagnjena k izcejanju.

Literatura

1. J. Zvokelj: Poročilo o preiskavi NGJL, Poročilo Metalurškega Inštituta v Ljubljani, 1975.
2. F. Vodopivec: Poročilo o preiskavi vzorca litine za valje. Poročilo Metalurškega Inštituta v Ljubljani, 1974.

ZUSAMMENFASSUNG

Sphärolitisches Gusseisen ist Stahl eutektoider oder überutektoider Zusammensetzung mit dem als Kugelgraphit ausgeschiedenem Kohlenstoff. Sphärolitisches Gusseisen wird mit dem Zusatz einer geeigneten Calcium Legierung in den flüssigen Stahl gewonnen. Der Kohlenstoffgehalt des Stahles zur Erzeugung des Kugelgraphite-Gusseisens muss mehr als 0,8 % und Siliziumgehalt mindestens 0,4 % sein. Wichtig ist es, dass bei so niedrigem Siliziumgehalt Kugelgraphit schon im Gusszustand auftritt.

Perlitguss tritt auf bei der Zusammensetzung 1,0 bis 1,5 % C, und 0,4 bis 1,5 % Si. Bei höheren Gehalten an Silizium kommt Ferrit zum Vorschein bzw. man erhält ihn nach dem Glühen.

Nach der Wärmebehandlung können ein martensitisches, bainitisches und perlitisches Gefüge, oder alle drei

zusammen auftreten. Wenn grössere Gusstücke gegläht werden, wo die Abkühlungsgeschwindigkeit des Durchmessers wegen begrenzt ist, können ein feineres perlitische Gefüge und bessere mechanische Eigenschaften als im Gusszustand erhalten werden.

Gusseisen ist zum seigern geneigt.

Eine ausgezeichnete Eigenschaft des sphärolitisches Gusseisens ist die Abriebfestigkeit. Die Abnutzung ist viel kleiner als bei dem legierten Stahlguss und Grauguss mit Kugelgraphit. Neben diesen Eigenschaften besitzt das sphärolitische Gusseisen noch eine sehr gute Dämpfungseigenschaft. Es wird für Zahnräder, Kurbelwellen, Automobileile u. s. w. verwendet. Es wird sehr erfolgreich für Walzen, besonders für Blooming und Vorgerüste angewendet.

SUMMARY

Spheroidal graphite cast steel is steel with eutectoidal or hypereutectoidal composition where carbon is precipitated in form of nodules. Spheroidal graphite cast steel can be manufactured in molten state by adding a corresponding calcium alloy into molten steel. Carbon content must be over 0.8 % and silicon higher than 0.4 %. It is important that spheroidal graphite in cast state is obtained at such low silicon.

Pearlite cast steel is obtained in the composition range 1.0 to 1.5 % C and 0.4 to 1.5 % Si. With higher silicon content, ferrite appears at least after annealing.

With heat treatment martensite, bainite or pearlite structure can be achieved or all the three of them simul-

taneously. If greater castings are annealed where the cooling rate is limited by the size of casting finer pearlite structure is obtained with improved mechanical properties than as cast.

Cast steel is prone to segregations.

The excellent property of the spheroidal graphite cast steel is its resistance to wear. Wear is much lower than with alloyed cast steel and spheroidal graphite grey cast iron. Besides, the graphite cast steel has also very good damping capacity. This cast steel is used for gears, crankshafts, car parts, etc. Very successfully is also used for rolls, especially for blooming and for roughing rolls.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стальное литье с шаровидным графитом представляет собой сталь эвтектического или заэвтектического состава в которой углерод выделен в шаровидной форме. Сталь с шаровидным графитом можно получить при добавке соответственного сплава элемента кальция непосредственно в расплавленный расплав. При этом содержание углерода в расплаве не должно быть менее 0,80 % а кремния не менее 0,40 %. Существенно, что структура шаровидного графита получается при очень низком содержании кремния. Перлитная структура получается при содержании 1,0—1,5 % C и 0,4—1,5 % Si. При более высоком содержании кремния получается ферритная или для ее получения выполняется отжиг. При выполнении термической обработки можно получить мартензитную, бейнитную или перлитную структуру, а также все

эти структуры вместе. В случае отжига более крупных отливок, несмотря на ограниченную быстроту охлаждения образуется мелкозернистая перлитная структура с более благоприятными механическими свойствами в сравнении с отлитым литьем.

Это литье овладевает с склонностью к зейгерванню. Превосходное свойство стального литья с шаровидным графитом это его износостойкость. Изнашивание гораздо слабее чем при сером чугуна с шаровидным графитом. Кроме этого стальное литье с шаровидным графитом имеет очень высокую заглушительность. Примерное назначение литья следующее: зубчатые колеса, кривошипные валы, детали для автомобилей, а в особенности для производства валков для блюминг и обжимных клетей.